

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/050177

International filing date: 17 January 2005 (17.01.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 102004002142.2  
Filing date: 15 January 2004 (15.01.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 17 March 2005 (17.03.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

PCT/EP200 5/ 0 5 0 1 7 7

02.03.05



EPO - Munich  
83  
02. März 2005

## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:**

10 2004 002 142.2

**Anmeldetag:**

15. Januar 2004

**Anmelder/Inhaber:**

ROBERT BOSCH GMBH, 70469 Stuttgart/DE

**Bezeichnung:**

Verfahren und Computerprogramm zum  
Generieren eines Modells für das Verhalten  
einer Steuereinrichtung

**IPC:**

G 05 B 17/00

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 22. Februar 2005  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Wehner

5 30.12.2003 WKL/GGA  
Robert Bosch GmbH, 70442 Stuttgart

10

Verfahren und Computerprogramm zum Generieren eines Modells  
für das Verhalten einer Steuereinrichtung

15 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Generieren eines  
Modells für das funktionale Verhalten einer  
Steuereinrichtung, wobei die Steuereinrichtung ausgebildet  
ist zum Berechnen einer geeigneten Stellgröße für eine  
Regelstrecke, insbesondere eines Luftpfadsystems einer  
20 Brennkraftmaschine, im Ansprechen auf einen vorgegebenen  
Sollwert für eine Regelgröße der Regelstrecke. Darüber  
hinaus betrifft die Erfindung ein Steuerungssystem und ein  
Regelungssystem jeweils mit einer derartig ausgebildeten  
Steuereinrichtung. Schließlich betrifft die Erfindung auch  
einen Datenträger mit dem genannten Computerprogramm.

Stand der Technik

Aus dem Stand der Technik, insbesondere aus der WO 89/09953  
30 ist ein derartiges Verfahren und sind derartige Systeme  
grundsätzlich bekannt. Es wird dort ein Verfahren zur  
Trajektorienfolge von Achspositionen eines Roboters  
vorgestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die  
Regelstrecke linear ist und mit Hilfe einer  
35 Übertragungsfunktion  $G(s)$  im Frequenzbereich beschrieben

werden kann. Aus der Trajektorienfolge, das heißt dem vorgegebenen Soll-Verlauf der Achsbewegung wird mit Hilfe einer Steuereinrichtung, deren Übertragungsfunktion der inversen Übertragungsfunktion der Regelstrecke entspricht, eine Stellgröße für die Regelstrecke bestimmt. Um die Regelgröße noch präziser auf den vorgegebenen Soll-Verlauf einstellen zu können, wird die Stellgröße erforderlichenfalls mit Hilfe einer parallel zu der Steuereinrichtung geschalteten Regeleinrichtung korrigiert. Zu diesem Zweck wird der Regeleinrichtung eine Regelabweichung zwischen einer Soll-Position und einer tatsächlichen Achsposition als Regelgröße zugeführt. Die Regeleinrichtung berechnet aus dieser Regelabweichung einen Korrekturanteil für die Stellgröße, welcher auf die von der Steuereinrichtung berechnete Stellgröße aufgeschaltet wird, um der Regelstrecke dann eine auf diese Weise generierte korrigierte Stellgröße zuzuführen.

Dem in der WO 89/09953 offenbarten Verfahren haftet der Nachteil an, dass es nur auf Regelstrecken mit linearem Verhalten und mit nur einer Regelgröße anwendbar ist.

Ausgehend von diesem Stand der Technik ist es deshalb die Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und Computerprogramm zum Generieren eines Modells für das funktionale Verhalten einer Steuereinrichtung sowie ein Steuerungssystem und ein Regelungssystem mit jeweils einer Steuereinrichtung mit einem derartig generierten Modell und einen Datenträger mit dem genannten Computerprogramm bereitzustellen, welche eine Generierung eines derartigen Modells für eine Steuereinrichtung auch dann ermöglichen, wenn das Verhalten einer der Steuereinrichtung nachgeschalteten Regelstrecke nicht linear ist und mehrere Regelgrößen zu steuern beziehungsweise zu regeln sind.

Diese Aufgabe wird durch das in Patentanspruch 1 beanspruchte Verfahren gelöst. Dieses Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass die Invertierung des Modells für die  
5 Regelstrecke zur Generierung des Modells für die Steuereinrichtung folgende Schritte umfasst: Berechnen einer Gleichung für die N'te Ableitung für die Regelgröße als Funktion der Stellgröße und der Regelgröße selber und/oder deren zeitlichen Ableitungen n'ter Ordnung mit  $n =$   
10 1...N-1; und Generieren des Modells für die Steuereinrichtung durch Auflösen der Gleichung für die N'te Ableitung für die Regelgröße nach der Stellgröße.

#### Vorteile der Erfindung

15

Dieses erfindungsgemäße Verfahren bietet den Vorteil, dass mit ihm die Generierung eines Modells für eine Steuereinrichtung innerhalb eines Steuerungssystems oder eines Regelungssystems auch dann möglich ist, wenn die  
20 jeweilige Regelstrecke in diesen Systemen ein nicht-lineares Verhalten zeigt und/oder mehrere Regelgrößen zu steuern oder zu regeln sind. Voraussetzung ist jedoch in jedem Fall, dass die Regelstrecke in Form eines mathematischen Modells mit physikalisch motivierten  
25 Gleichungen beschreibbar ist. Das erfindungsgemäß generierte Modell für die Steuereinrichtung hat dann Gültigkeit im gesamten Betriebsbereich der Regelstrecke, der durch das Modell abgebildet wird.

30 Vorteilhafterweise ist es in der Regel für die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens nicht erforderlich, dass das Modell für die Regelstrecke deren funktionales Verhalten vollumfänglich und sehr detailliert beschreibt. Vielmehr ist es für die vorliegende Erfindung ausreichend,

ein eventuell reduziertes Modell der Regelstrecke zu verwenden, welches deren Dynamik und deren lineares beziehungsweise nicht lineares Verhalten nur insoweit abbildet, als es für die Regelung relevant ist.

5

Ein Ausführungsbeispiel zur Generierung eines Modells für die Steuereinrichtung gemäß der Erfindung ist Gegenstand eines Unteranspruchs.

10

Die oben genannte Aufgabe wird weiterhin durch ein Computerprogramm zum Durchführen des Verfahrens, durch einen Datenträger mit diesem Computerprogramm sowie durch ein Steuerungssystem und ein Regelungssystem, jeweils mit einer Steuereinrichtung mit dem erfindungsgemäß generierten

15

Modell gelöst. Die Vorteile dieser Lösungen entsprechen den oben mit Bezug auf das beanspruchte Verfahren genannten Vorteilen.

20

Darüber hinaus bewirkt eine in dem Regelungssystem vorgesehene Regeleinrichtung vorteilhafterweise eine zusätzliche Präzisierung beziehungsweise Korrektur der Stellgröße, so dass mit Hilfe dieser Regeleinrichtung die Regelgröße noch präziser auf den jeweils vorgegebenen Sollwert eingeregelt werden kann. Bei Verwendung einer

25

Steuereinrichtung mit dem erfindungsgemäß generierten Modell muss diese Regeleinrichtung lediglich kleine Abweichungen der Regelgröße von dem Sollwert beziehungsweise einer vorgegebenen Soll-Trajektorie ausregeln; sie ist deshalb insbesondere im Vergleich zu bekannten Kennfeld-basierten Regeleinrichtungen entlastet und deshalb sehr robust.

30

Weil das Modell - zumindest in der Regel - im gesamten Betriebsbereich der Regelstrecke Gültigkeit hat, brauchen

bei der Regeleinrichtung auch nur lediglich deren jeweilige Reglerparameter für den gesamten Betriebsbereich der Regelstrecke einmalig eingestellt zu werden. Eine ständige Anpassung der Reglerparameter an immer wieder neue  
 5 Arbeitspunkte der Regelstrecke ist bei Verwendung des erfindungsgemäß generierten Modells für die Steuereinrichtung entbehrlich.

#### Zeichnungen

10

Der Beschreibung sind insgesamt drei Figuren beigelegt, wobei

15

Figur 1 ein Steuerungssystem gemäß der Erfindung;

Figur 2 das erfindungsgemäße Verfahren; und

Figur 3 ein Regelungssystem gemäß der Erfindung

20

zeigt.

#### Beschreibung der Ausführungsbeispiele

25

Die Erfindung wird nachfolgend in Form von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die genannten Figuren detailliert beschrieben.

30

In Figur 1 ist ein Steuerungssystem 100 zur Steuerung einer Regelgröße  $y$  gezeigt. Dieses Steuerungssystem 100 umfasst eine Sollwert-Vorgabeeinrichtung 110 zum Vorgeben von  
 mindestens einem Sollwert  $y_d$  für die Regelgröße  $y$ , insbesondere in Form einer Trajektorienfolge. Bei dem in Figur 1 gezeigten Beispiel erzeugt die Sollwert-Vorgabeeinrichtung 110  $n+1$  Sollwerte in Form eines

Sollwertes  $y_a$  und dessen erster bis n-ter zeitlicher Ableitung.

Weiterhin umfasst das Steuerungssystem 100 eine  
 5 Steuereinrichtung 120 zum Umsetzen dieser Sollwerte in mindestens eine Stellgröße  $u_d$ . Diese Stellgröße  $u_d$  dient als Eingangsgröße für eine Regelstrecke 130 zum Steuern der Regelgröße  $y$  am Ausgang der Regelstrecke.

10 Die Stellgröße  $u_d$  ist von der Steuereinrichtung 120 so zu dimensionieren, dass die Regelgröße  $y$  am Ausgang der Regelstrecke 130 auf den von der Sollwert-Vorgabeeinrichtung 110 ausgegebenen Sollwert  $y_a$  eingestellt wird. Dazu ist es erforderlich, dass die Steuereinrichtung  
 15 120 geeignet ausgebildet wird. Diese geeignete Ausbildung der Steuereinrichtung 120 ist Gegenstand der Erfindung und wird nachfolgend detailliert beschrieben.

In Figur 2 sind die einzelnen Verfahrensschritte zur  
 20 Generierung eines geeigneten mathematischen Modells zur Beschreibung des funktionalen Verhaltens der Steuereinrichtung 120 detailliert beschrieben. Dabei wird vorausgesetzt, dass ein mathematisches Modell in Form physikalischer Modellgleichungen für die Regelstrecke 130  
 25 bekannt ist. Vorzugsweise enthalten diese Modellgleichungen für die Regelstrecke 130 lediglich die für die Regelung entscheidenden dynamischen Effekte. Die Modellgleichungen werden in der Regel aus Erhaltungssätzen beziehungsweise Axiomen gewonnen und sind typischerweise in der folgenden  
 30 Form darstellbar:

$$\dot{x} = f(x, u), \quad x(0) = x_0 \in \mathbb{R}^n, \quad u \in \mathbb{R}^m \quad (1)$$

wobei



- x einen Zustandsvektor repräsentiert, der vorzugsweise lediglich die aus regelungstechnischer Sicht notwendigen Zustandsgrößen umfasst;  
 u einen Stellvektor repräsentiert, welcher mindestens eine Stellgröße umfasst;  
 f eine beliebige mathematische Funktion, insbesondere eine Differenzialgleichung repräsentiert;  
 $x_1(0)$  eine Zustandsgröße zum Zeitpunkt  $t = 0$  repräsentiert; und  
 $x_0$  einen Anfangswert repräsentiert.

- 15 Alle Zustandsgrößen  $x_1$  als Komponenten des Zustandsvektors sowie auch alle Stellgrößen  $u$  sind grundsätzlich zeitabhängige Größen.

- Das erfindungsgemäße Verfahren zur Berechnung eines mathematischen Modells für die Steuereinrichtung 120 soll nachfolgend am Beispiel für die Steuerung beziehungsweise Regelung einer Regelstrecke 130 mit nicht-linearem Verhalten erläutert werden. Bei der Strecke handelt es sich beispielhaft um eine von einem Elektromotor bewegte Masse.  
 25 Das Verhalten dieser Regelstrecke kann durch folgendes nicht lineares Differenzialgleichungssystem dargestellt werden:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2a)$$

$$30 \quad \dot{x}_2 = -x_1^2 - x_2 + x_3 \quad (2b)$$

$$\dot{x}_3 = -ax_3 - x_2 + u_d \quad (2c)$$

In diesem Differenzialgleichungssystem wird ein Zustandsvektor  $x$  mit drei Zustandsgrößen  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  zur Beschreibung des funktionalen Verhaltens der Regelstrecke verwendet. Aufgrund der Verwendung von drei Zustandsgrößen spricht man bei der Regelstrecke auch von einem System dritter Ordnung. Für die genannte Regelstrecke bezeichnet die Zustandsgröße  $x_1$  den von der Masse zurückgelegten Weg, die Zustandsgröße  $x_2$  die Geschwindigkeit der Masse und die Zustandsgröße  $x_3$  den Strom in dem Elektromotor. Der Parameter  $a$  in Gleichung 2c ist ein Modellparameter. Die besagte Regelstrecke umfasst weiterhin eine nicht-lineare Feder, welche durch den quadratischen Term in Gleichung 2b beschrieben ist. Alle Zustände  $x_i$  mit  $i = 1 \dots N=3$ , der Parameter  $a$  sowie die Stellgröße  $u$  sind normiert und somit dimensionslos.

Nachfolgend wird das erfindungsgemäße Verfahren am Beispiel der Berechnung eines Modells für eine Steuereinrichtung, welche abgestimmt ist auf eine Regelstrecke mit dem in den Gleichungen 2a - 2c beschriebenen funktionalen Verhalten, erläutert.

Dazu wird zunächst, wie in Figur 2 dargestellt, die zu regelnde Zustandsgröße  $x_1$  aus den Komponenten des Zustandsvektors  $x$  ausgewählt. Beispielhaft soll hier die Zustandsgröße  $x_1$ , also der von der Masse zurückgelegte Weg, als Regelgröße  $y$  ausgewählt werden. Mathematisch lässt sich diese Auswahl durch die folgende einfache Gleichung (3) beschreiben:

$$y = x_1$$

(3)

Nachfolgend sieht das erfindungsgemäße Verfahren gemäß Figur 2 vor, dass die ersten N Ableitungen  $(\dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(N)})$  der Regelgröße  $y$  gebildet werden.

5. In dem genannten konkreten Beispiel mit einer Regelstrecke dritter Ordnung  $N=3$  werden also die erste, zweite und dritte Ableitung gebildet. Diese berechnen sich unter Berücksichtigung der Differentialgleichungen 2a, 2b und 2c des Modells der Regelstrecke 130 wie folgt:

$$y = x_1 \quad (3)$$

$$\dot{y} = \dot{x}_1 = x_2 \quad (4)$$

$$\ddot{y} = \ddot{x}_1 = -x_1^2 - x_2 + x_3 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} = \ddot{x}_1 &= -2x_1\dot{x}_1 - \dot{x}_2 + \dot{x}_3 \\ &= -2x_1x_2 - (-x_1^2 - x_2 + x_3) + (-ax_3 - x_2 + u_d) \\ &= x_1^2 - 2x_1x_2 + (1-a)x_3 + u_d \end{aligned} \quad (6)$$

15

Die Gleichungen (3), (4) und (5) repräsentieren ein Gleichungssystem mit drei Gleichungen und den drei Zustandsvariablen  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$ . Das erfindungsgemäße Verfahren sieht nun vor, dass dieses Gleichungssystem dazu verwendet wird, den Zustandsvektor  $x = [x_1, x_2, x_3]^T$  zu berechnen. Die einzelnen Zustandsgrößen  $x_i$  mit  $i = 1 - 3$  als Komponenten dieses Zustandsvektors berechnen sich durch Lösen dieses Gleichungssystems. Für das besagte Beispiel berechnet sich der Zustandsvektor  $x$  mit der beschriebenen

25. Vorgehensweise wie folgt:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ y^2 + \dot{y} + \ddot{y} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Vorteilhafterweise sind die einzelnen Zustandsgrößen  $x_i$  bei der Darstellung gemäß Gleichung 7 jeweils als mathematische Funktion von nur noch der Regelgröße  $y$  und/oder deren zeitlichen Ableitungen  $(\dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(N)})$  dargestellt.

5

Generell sieht das erfindungsgemäße Verfahren dann weiterhin vor, dass eventuell vorhandene Zustandsgrößen  $x_i$  in der  $N$ 'ten Ableitung  $y^{(N)}$  der Regelgröße  $y$  durch ihre jeweils äquivalenten Darstellungen in Abhängigkeit der Regelgröße  $y$  oder deren zeitliche Ableitungen gemäß Gleichung 7 ersetzt werden.

15

Bei Anwendung dieser Vorgehensweise auf das Beispiel muss in der  $N=3$ 'ten Ableitung der Regelgröße gemäß Gleichung (6) eine entsprechende Ersetzung vorgenommen werden. Gleichung (6) wird dann unter Berücksichtigung von Gleichung (7) wie folgt umgeformt:

$$\ddot{y} = u_d - \dot{y} - 2y\dot{y} - \ddot{y} - a(y^2 + \dot{y} + \ddot{y}) \quad (8)$$

20

Eine Auflösung der Gleichung (8) nach der Stellgröße  $u$  führt direkt auf das gesuchte Modell für die Steuerung 120, wenn die zu steuernde Regelstrecke 130 das durch die Gleichungen 2a, 2b und 2c beschriebene funktionale Verhalten zeigt. Das mathematische Modell für die Steuereinrichtung 120 beschreibt dann die Stellgröße  $u$  als Ausgangsgröße der Steuereinrichtung 120 in funktionaler Abhängigkeit ihrer Eingangsgrößen, d.h. der vorgegebenen Sollwerte für die Regelgröße  $y$ . Das Modell für die Steuereinrichtung lässt sich dann für die beispielhaft erwähnte Regelstrecke wie folgt darstellen:

30

$$u_d = \dot{y} + \ddot{y} + \ddot{y} + 2\dot{y}y + a(\dot{y} + \ddot{y} + y^2) \quad (9)$$

Gleichung (9) als Modell der Steuereinrichtung repräsentiert in der Darstellung  $u_d=f(y)$  eine Invertierung des Modells der Regelstrecke 130, welches typischerweise in der Form  $y=g(u_d)$  dargestellt wird, vgl. Gleichungen (3) bis (6).

Die hier beispielhaft durch die Gleichungen 2a, 2b und 2c beschriebene Regelstrecke in Form einer durch einen Elektromotor bewegten Masse diene lediglich zur Veranschaulichung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Grundsätzlich ist das erfindungsgemäße Verfahren auf jede Art von Regelstrecken anwendbar, deren funktionales Verhalten durch physikalisch motivierte auch nicht-lineare Modellgleichung beschreibbar ist. Das gilt insbesondere auch für ein Luftpfadsystem einer Brennkraftmaschine als Regelstrecke. Eine solche Regelstrecke kann durch geeignet gewählte Modellgleichungen unter Verwendung der Zustandsgrößen Saugrohrdruck, Masse der Luft im Saugrohr und Temperatur der Luft im Saugrohr nachgebildet werden. Das erfindungsgemäße Verfahren zur Berechnung eines geeigneten Modells für eine Steuereinrichtung ist insbesondere auch für ein Modell einer derartigen Regelstrecke anwendbar.

Eine zusätzliche beziehungsweise weitergehende Stabilisierung der Regelgröße im Hinblick auf den vorgegebenen Sollwert beziehungsweise die vorgegebene Trajektorienfolge lässt sich durch eine zu der Steuereinrichtung 120 parallel geschaltete Regeleinrichtung 150 realisieren, wie dies in Figur 3 veranschaulicht ist. Das in Figur 3 dargestellte Regelungssystem basiert auf dem in Figur 1 dargestellten Steuerungssystem, wobei das

funktionale Verhalten der Steuereinrichtung 120 durch ein mathematisches Modell beschrieben wird, welches vorzugsweise gemäß der vorliegenden Erfindung generiert wurde. Neben dem Steuerungssystem 100 umfasst das

5 Regelungssystem gemäß Figur 3 jedoch noch zusätzlich die besagte Regeleinrichtung 150. Dabei kann es sich um einen beliebigen Regler, zum Beispiel um einen  $PIDT_1$ -Regler handeln. Ihm wird eine Regelabweichung  $e$  zwischen der Regelgröße  $y$  am Ausgang der Regelstrecke 130 und dem  
10 vorgegebenen Sollwert  $y_d$  für die Regelgröße als Eingangsgröße zugeführt. Mathematisch berechnet sich die Regelabweichung  $e$  wie folgt:

$$e(t) = y_d(t) - y(t) \quad (10)$$

15

Die Regeleinrichtung 150 generiert dann nach Maßgabe der Regelabweichung  $e$  unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Reglerparameter  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  und/oder  $T_1$  geeignete Korrekturanteile für die Stellgröße  $u$ . Ein proportionaler  
20 Korrekturanteil  $u_P$  für die Stellgröße  $u$  berechnet sich wie folgt:

$$u_P = K_P e \quad (11)$$

25 wobei

$K_P$  den Reglerparameter für den proportionalen Korrekturanteil

30 repräsentiert.

Ein integraler Regelanteil  $u_I$  berechnet sich typischerweise wie folgt:

$$u_I = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad u_I(0) = u_I^0 \quad (12)$$

wobei

- 5         $K_I$      den Reglerparameter für den integralen Korrekturanteil; und  
           $u_I^0$     einen Anfangswert für den integralen Regelanteil

repräsentiert.

Wenn die Regeleinrichtung 150 zusätzlich auch einen differenziellen Regelanteil umfasst, dann berechnet sich dieser typischerweise wie folgt:

$$15 \quad T_1 \dot{u}_D + u_D = K_D \dot{e}, \quad u_D(0) = u_D^0 \quad (13)$$

wobei

- 20         $K_D$      den Reglerparameter für den differenziellen Regelanteil; und  
           $u_D^0$     einen Anfangswert für den differenziellen Regelanteil

repräsentiert.

25

Wenn die Regeleinrichtung 150 tatsächlich sowohl einen Proportionalanteil wie auch einen Integral- und Differenzialanteil umfasst, dann berechnet sich der Korrekturanteil  $u_{ctrl}$  für die Stellgröße  $u$  als Summe aus  
 30 diesen Anteilen wie folgt:

$$u_{ctrl} = u_P + u_I + u_D \quad (14)$$

wobei

- $u_p$  den proportionalen Regelanteil;
- $u_i$  den integralen Regelanteil; und
- 5  $u_d$  den differentiellen Regelanteil

repräsentiert.

10 Der so berechnete Gesamt-Korrekturanteil  $u_{ctrl}$  der Stellgröße  $u$  wird dann mit Hilfe einer Additions- oder Subtraktionseinrichtung 140 zu der von der Steuereinrichtung 120 berechneten Stellgröße  $u_d$  hinzuaddiert, um aus dieser Addition schließlich eine resultierende korrigierte Stellgröße  $u$  zu gewinnen. Die

15 korrigierte Stellgröße bewirkt im Unterschied zu der von der Steuereinrichtung 120 bereitgestellten Stellgröße eine noch präzisere Einreglung der Regelgröße  $y$  auf die Soll-Größe  $y_d$ .

20 Das erfindungsgemäße Verfahren wird vorzugsweise in Form eines Computerprogramms realisiert. Das Computerprogramm kann gegebenenfalls zusammen mit weiteren Computerprogrammen auf einem computerlesbaren Datenträger abgespeichert sein. Bei dem Datenträger kann es sich um

25 eine Diskette, eine Compact Disc, einen sogenannten Flash-Memory oder dergleichen handeln. Das auf dem Datenträger abgespeicherte Computerprogramm kann dann als Produkt an einen Kunden übertragen oder verkauft werden. Alternativ zu

30 einer Übertragung per Datenträger ist auch eine Übertragung des Computerprogramms über ein elektronisches Kommunikationsnetzwerk, insbesondere das Internet möglich.



5 30.12.2003  
Robert Bosch GmbH, 70442 Stuttgart

10 Ansprüche

1. Verfahren zum Generieren eines Modells für das funktionale Verhalten einer Steuereinrichtung (120), wobei die Steuereinrichtung (120) ausgebildet ist zum
- 15 Berechnen einer geeigneten Stellgröße ( $u_d$ ) für eine nachgeschaltete Regelstrecke (130), insbesondere eines Luftpfadsystems einer Brennkraftmaschine, im Ansprechen auf einen vorgegebenen Sollwert ( $y_d$ ) für mindestens eine Regelgröße ( $y$ ) der Regelstrecke (130); umfassend die
- 20 Schritte:
- Vorgeben eines Modells, welches das funktionale Verhalten der Regelstrecke (130) mit Hilfe von Zustandsgrößen ( $x_i$ ) repräsentiert, wobei eine der Zustandsgrößen ( $x_i$  mit  $i=1...N$ ) die Regelgröße ( $y$ ) repräsentiert; und
  - 25 - Generieren des Modells für die Steuereinrichtung (120) durch Invertieren des Modells für die Regelstrecke (130); **dadurch gekennzeichnet, dass** die Invertierung folgende Schritte umfasst:
- Berechnen einer Gleichung für die  $N'$ te Ableitung  $(y^{(N)})$  für
  - 30 die Regelgröße ( $y$ ) als Funktion der Stellgröße ( $u_d$ ) und der Regelgröße ( $y$ ) selber und/oder deren zeitlichen Ableitungen  $n'$ ter Ordnung ( $\dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(N)}$ ); und
  - Generieren des Modells für die Steuereinrichtung (120)

durch Auflösen der Gleichung für die N'te Ableitung ( $\overset{(N)}{y}$ ) für die Regelgröße ( $y$ ) nach der Stellgröße ( $u_d$ ).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung der N'ten Ableitung der Regelgröße folgende Schritte umfasst:
- Auswählen einer der Zustandsgrößen ( $x_i$  mit  $i = 1 \dots N$ ) als Regelgröße ( $y$ );

- Berechnen der 1, 2, ... bis N'ten Ableitung ( $\dot{y}, \ddot{y}, \dots, \overset{(N)}{y}$ ) der Regelgröße ( $y$ ) nach der Zeit als Funktion der Zustandsgrößen ( $x_i$ ) und eventuell der Stellgröße ( $u_d$ );
- Berechnen jeder der einzelnen Zustandsgrößen ( $x_i$  mit  $i=1 \dots N$ ) als Funktion der Regelgröße und/oder deren zeitlichen Ableitungen ( $\dot{y}, \ddot{y}, \dots, \overset{(N-1)}{y}$ ) durch Umformen der Gleichungen für die Ableitungen der Regelgröße;
- Umformen der N'ten Ableitung der Regelgröße ( $y$ ) durch Eliminieren aller Zustandsgrößen ( $x_i$ ) in der N'ten Ableitung ( $\overset{(N)}{y}$ ) der Regelgröße durch Ersetzen dieser Zustandsgrößen ( $x_i$ ) dort durch ihre entsprechenden Funktionen in Abhängigkeit der Regelgröße ( $y$ ) und/oder deren zeitlichen Ableitungen 1, ..., N-1'ter Ordnung ( $\dot{y}, \ddot{y}, \dots, \overset{(N-1)}{y}$ ); und
- Generieren des Modells für die Steuereinrichtung (120) durch Auflösen der umgeformten N'ten Ableitung ( $\overset{(N)}{y}$ ) der Regelgröße ( $y$ ) nach der Stellgröße ( $u_d$ ).

3. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Modell der Regelstrecke (130) das funktionale Verhalten der Regelstrecke nur insoweit mit Hilfe von Modellgleichungen abbildet, als dass

das Verhalten für eine Steuerung beziehungsweise Regelung der Regelgröße relevant ist.

4. Computerprogramm mit Programmcode für ein Steuerungs- oder Regelungssystem dadurch gekennzeichnet, dass das
- 5 Computerprogramm ausgebildet ist zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3.
5. Datenträger gekennzeichnet durch das Computerprogramm nach Anspruch 4.
6. Steuerungssystem (100) zur Steuerung einer Regelgröße (y), umfassend:
  - eine Sollwertvorgabeeinrichtung (110) zum Vorgeben von mindestens einem Sollwert ( $y_d$ ) für die Regelgröße (y), insbesondere in Form einer Trajektorienfolge;
  - eine Steuereinrichtung (120) zum Umsetzen des Sollwertes
  - 15 ( $y_d$ ) in mindestens eine Stellgröße ( $u_d$ ); und
  - eine Regelstrecke (130) zum Steuern der Regelgröße (y) an ihrem Ausgang im Ansprechen auf die Stellgröße ( $u_d$ ) so, dass die Regelgröße (y) auf den Sollwert ( $y_d$ ) eingeregelt wird;
  - 20 wobei das funktionale Verhalten der Regelstrecke (130) und der Steuereinrichtung (120) jeweils durch eigene Modelle repräsentiert wird und das Modell für die Steuereinrichtung (120) dem inversen Modell für die Regelstrecke (130) entspricht;
  - 25 **dadurch gekennzeichnet, dass** das Modell für die Steuereinrichtung (120) gebildet ist durch:
    - Berechnen der N'ten Ableitung für die Regelgröße als Funktion der Stellgröße und der Regelgröße selber und/oder
    - 30 deren zeitlichen Ableitungen n'ter Ordnung mit  $n=1...N-1$ ; und
    - Generieren des Modells für die Steuereinrichtung durch

Auflösen der N'ten Ableitung für die Regelgröße nach der Stellgröße.

7. Regelungssystem zum Regeln einer Regelgröße, umfassend:

- 5 ein Steuerungssystem nach Anspruch 6;  
eine Regeleinrichtung (150) zum Berechnen eines Korrekturanteils ( $u_{ctrl}$ ) für die Stellgröße aus einer empfangenen Regelabweichung ( $e$ ) zwischen der Regelgröße ( $y$ ) am Ausgang der Regelstrecke (130) und dem Sollwert ( $y_d$ );  
und  
eine Additions- beziehungsweise Subtraktionseinrichtung (140) zum Berechnen einer korrigierten Stellgröße ( $u$ ) für die Regelstrecke (130) durch Addieren des Korrekturanteils ( $u_{ctrl}$ ) für die Stellgröße zu der von der Steuereinrichtung
- 15 (120) berechneten Stellgröße ( $u_d$ ).

30.12.2003 WKL/GGA  
5. Robert Bosch GmbH, 70442 Stuttgart

Verfahren und Computerprogramm zum Generieren eines Modells  
für das Verhalten einer Steuereinrichtung

10

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und Computerprogramm  
15 zum Generieren eines Modells für das funktionale Verhalten  
einer Steuereinrichtung (120) zum Generieren einer  
Stellgröße ( $u_d$ ) für eine Regelstrecke (130) im Ansprechen  
auf einen vorgegebenen Sollwert ( $y_d$ ). Erfindungsgemäß  
erfolgt die Generierung des Modells auch für nicht-lineare  
20 Regelstrecken (130) durch Ausführen der folgenden Schritte:  
Berechnen der N'ten Ableitung für die Regelgröße als  
Funktion der Stellgröße und der Regelgröße ( $y$ ) selber  
und/oder deren zeitlichen Ableitungen n'ter Ordnung und  
Generieren des Modells für die Steuereinrichtung (120)  
25 durch Auflösen der N'ten Ableitung für die Regelgröße ( $y$ )  
nach der Stellgröße ( $u_d$ ). Figur 1

Fig. 1

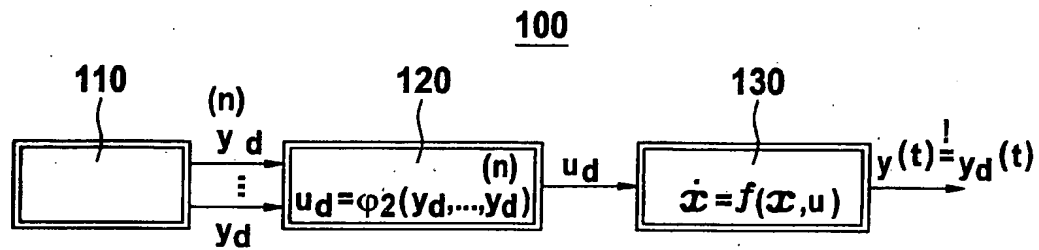


Fig. 2

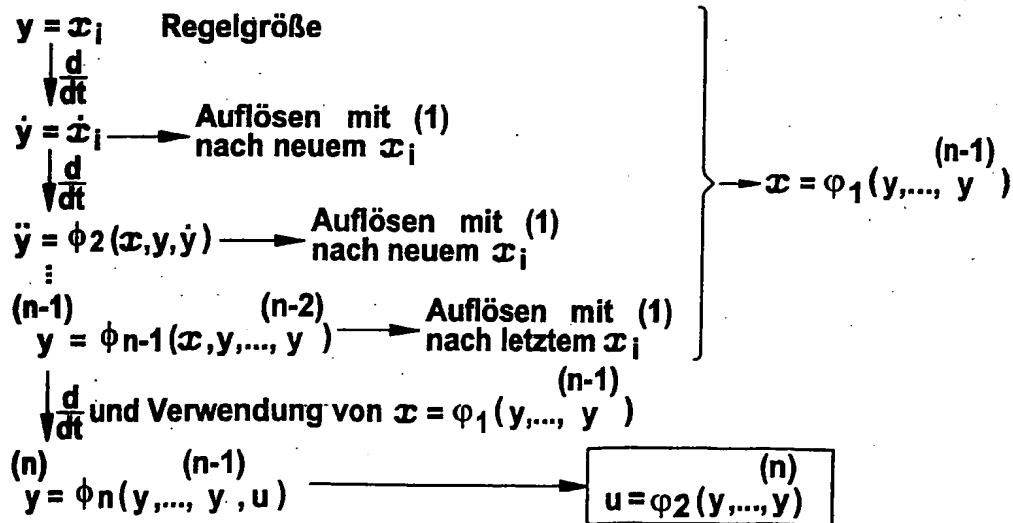


Fig. 3

